

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201807037

etal 基于生理生化指标选择红锥二代优良家系

谭长强, 申文辉, 刘秀, 曹艳云, 黄志玲, 郝海坤

(广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002)

摘要: 通过对 29 个红锥优树二代家系苗光合碳氮同化过程关键物 (叶绿素、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性、总 ATP 酶含量、PEP 羧化酶含量和 RUBP 羧化酶含量) 进行测定, 运用主成分分析及隶属函数法进行优良家系的筛选和评价。结果表明: 9 个生理指标 29 个家系间均存在显著差异。叶绿素 a 含量为 0.13~0.72 mg·g⁻¹Fw, 叶绿素 b 含量为 0.01~0.27 mg·g⁻¹Fw, 叶绿素 a+b 含量为 0.18~0.98 mg·g⁻¹Fw, 类胡萝卜素含量为 0.03~0.32 mg·g⁻¹Fw, 硝酸还原酶活性为 1.16~10.26 μg·g⁻¹·h⁻¹, 谷氨酰胺合成酶活性为 0.30~1.24 A·mg⁻¹protein·h⁻¹, 总 ATP 酶含量为 0.37~3.55 U·mg⁻¹prot, PEP 羧化酶含量为 8.42~21.24 IU·L⁻¹, RUBP 羧化酶含量为 2.09~9.12 ng·mL⁻¹。其中总 ATP 酶含量变异最大, 其次为硝酸还原酶活性; 变异最小的为 RUBP 羧化酶含量。采用主成分分析及隶属函数法分别多指标的综合评价方法筛选出 10 个红锥优树二代优良家系, 重复率达到了 90%, 分别为 B2、B5、P5、A6、P3、P6、R3、D2、R4 家系。说明主成分分析法和隶属函数法均可用于评价红锥二代优良家系。其中家系 B2、B5 表现最佳。

关键词: 转化酶, 隶属函数法, 苗期变异, 主成分分析法, 苗期选择

Seedling selection of the fast growing second superior families of *Castanopsis hystrix* based on the analysis of physiological indices

TAN Zhangqiang[†], SHEN Wenhui^{*†}, LIU Xiu[†], CAO Yanyun[†], HUANG Zhiling[†], HAO Haikun[†]([†]-Guangxi Academy of Forestry, Nanning 530002, China)

Abstract: By using 29 families of one-year-old *Castanopsis hystrix* seedlings as experimental material, it was measured of the key substance in the process of photosynthetic carbon and nitrogen assimilation of Chlorophyll, nitrate reductase and glutamine synthetase activity, total contents of ATP enzyme, PEP carboxylase and RUBP carboxylase content, and their superiority was evaluated with principal component analysis and membership function method. The results showed that there were significant difference of all index among the 29 families. The chlorophyll a content varied from 0.13 to 0.72 mg·g⁻¹Fw, the chlorophyll b content varied from 0.01 to 0.27 mg·g⁻¹Fw, the chlorophyll(a+b) content varied from 0.18 to 0.98 mg·g⁻¹Fw, the carotenoid content varied from 0.03 to 0.32 mg·g⁻¹Fw, the nitrate reductase activity varied from 1.16 to 10.26 μg·g⁻¹·h⁻¹, the glutamine synthetase activity varied from 0.30 to 1.24 A·mg⁻¹protein·h⁻¹, the total contents of ATP enzyme varied from 0.37 to 3.55 U·mg⁻¹prot, the PEP carboxylase content varied from 8.42 to 21.24 IU·L⁻¹ and the RUBP carboxylase content varied from 2.09 to 9.12 ng·mL⁻¹. Among indices the total contents of ATP enzyme varied most, follow by the nitrate reductase activity, and the RUBP carboxylase content varied minimum. The ten families was selected respectively by principal component analysis and the method of subordinate function respectively and repetition rate reached 90%. Repeat the families were B2, B5, P5, A6, P3, P6, R3, D2 and R4 family. This instructed that principal component analysis and subordinate function method are

基金项目: 广西科技攻关计划项目 (桂科攻 1598006-3-8); 广西林业科技项目 (桂林科研 [2015] 1 号); 中央财政林业科技推广示范项目 [2015]TG17 号 [Supported by Science and Technology Program of Guangxi (1598006-3-8); Forestry Science and Technology Program of Guangxi ([2015]1); Forestry Science and Technology Promotion Demonstration Program of China([2015]TG17)]。作者简介: 谭长强 (1987-), 男, 硕士, 广西桂林人, 工程师, 主要从事森林培育和森林生态研究, (E-mail) 315990730@qq.com。通讯作者: 申文辉 (1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事森林培育和森林生态研究, (E-mail) shenwenhui2003@163.com。

good be used in the evaluation of the second generation family of *Castanopsis hystrix*.

~~Evaluated by using the synthesized multi-index it was found that 10 families of *Castanopsis hystrix* showed good characters of photosynthetic carbon and nitrogen assimilation, was B2 and B5 family performing the best.~~

Keywords: invertase; membership function method; seedling stage variation; principal component analysis; seedling selection

早期选择是林木未达到经济成熟前所进行的选择(杨秀艳等, 2004)。前人研究指出, 对林木苗期个体及优良家系的选择, 不但能缩短育种周期, 同时还能降低测定林的试验规模, 更好的提高林木遗传增益, 降低试验成本(杜克兵等, 2009; 刘代亿等, 2009; 王军辉等, 2000)。叶绿素具有吸收和传递光能的作用, 为植物光合作用提供最原始的能量来源, 其含量的高低在一定层面上可以反映植物生产能力(高红霞等, 2016; 陈隆升, 2009)。硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、总 ATP 酶、PEP 羧化酶和 RUBP 羧化酶等转化酶是衡量植物同化及转化利用能力, 以及植物细胞代谢及生长强度的指标(高红霞等, 2016; 陈隆升, 2009; 蔡瑞国等, 2008; 杨亮等, 2007; 郝乃斌等, 1991; 潘瑞炽, 2010; 吴正锋等, 2014; 赵蓉等, 2013; Liu SL et al., 2015; 周竹青等, 2009; 陈颖等, 2015)。因此, 通过研究红锥苗期生理及转化酶指标, 进行红锥优良家系的苗期筛选, 具有现实的可行性。

红锥(*Castanopsis hystrix*)为壳斗科栲属(*Castanopsis*)的常绿乔木, 是优质珍贵用材树种, 适应性强, 生长快(朱积余等, 2014)。目前, 仅广西红锥造林面积已达 15 000 hm² 以上, 随着国家乡土珍贵树种木材储备计划的实施、市场对高档珍贵用材的需求的增长以及天然林的禁伐, 红锥人工造林的区域将进一步扩大。而对红锥的遗传改良研究相对滞后, 难以满足生产对其的需要。当前对红锥遗传改良研究多集中在红锥优树一代家系生长性状、光合能力等方面(朱积余等, 2014; 蒋焱等, 2013), 有关利用红锥光合碳氮同化过程中关键物质的红锥二代优良家系早期选择未见报道, 本研究将为红锥进一步的选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设置于广西南宁广西林科院珍贵树种苗圃(108°20' E, 22°55' N), 属湿润的亚热带季风气候, 海拔约 80 m, 7~8 月平均气温 28.2℃, 1 月平均气温 12.80℃, 极端最高气温 39.4℃, 极端最低气温-1.5℃, 年均气温 21.7℃。日照时数 1550 h 以上, 10℃积温为 7200℃, 全年几乎无霜; 年均降雨量 1300 mm, 干湿季节明显, 主要集中在 4~9 月。土壤为赤红壤, pH 值为 5.6, 肥力中等, 土壤经风干、粉碎、过筛备用。

1.2 试验材料及来源

种子于 2016 年 11 月~12 月采集于广西凭祥的红锥优树子代林, 共计 29 个家系。沤晒去壳后, 筛选健壮饱满种子, 然后将所有种子撒于沙床中催芽, 待当 60%~70%的种子胚芽出土时即可开始移植, 选取长出胚芽或叶子的小苗进行移植至规格为 18cm×18cm 的育苗袋中, 基质为黄心土。育苗采取相同的水肥、杀虫等管理措施。

1.3 生理指标测定

于 2018 年 1 月, 选择每个家系苗高、地径平均值附近的 5 株进行生理指标的测定, 每株选取 3 片无病虫害、刚成熟而未老化的叶片, 每个指标 3 次重复。各指标测定方法如下,

叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量采用丙酮-乙醇混合提取法（邹琦, 2000），硝酸还原酶活性采用活体法（邹琦, 2000），谷氨酰胺合成酶参照蔡红梅等（2010）的测定方法，总 ATP 酶采用南京建成的超微量 ATP 酶测试盒测定，PEP 羧化酶、RUBP 羧化酶采用酶联免疫法的 ELISA 试剂盒测定。

1.4 数据分析与统计

利用 WPS、DPS7.05 和 SPSS19.0 对试验数据进行整理及统计分析。不同红锥家系综合评价用隶属函数法，其公式为：

$$u(x_{ij}) = (x_{ij} - x_{j \min}) / (x_{j \max} - x_{j \min}) \dots\dots\dots(1)$$

式中： $u(x_{ij})$ 为红锥 i 家系 j 指标的标准化值， x_{ij} 为红锥 i 家系 j 指标值， $x_{j \max}$ 为各家系 j 指标的最大值。确定不同指标的权重，权重确定采用标准差系数法。计算标准差系数 v_j ，再求各指标的权重 w_j 。

$$V_j = \sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2) / X_j} \dots\dots\dots(2)$$

$$W_j = V_j / \sum_{j=1}^n V_j \dots\dots\dots(3)$$

最后，求不同家系各指标的综合评价值，用来衡量不同红锥优树二代苗木的优劣状况。

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j] \dots\dots\dots(4)$$

2 结果与分析

2.1 29 个红锥优树二代家系苗生理指标

从表 1 可看出，29 个家系的叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、总 ATP 酶、PEP 羧化酶、RUBP 羧化酶在 29 个红锥二代家系间差异显著（ $P < 0.05$ ）。这表明红锥优树二代家系间存在丰富变异，开展红锥优树二代优良家系的苗期选择是可行的。其中，叶绿素 a 含量为 0.13~0.72 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，平均值为 0.38 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，P5 家系含量最高，比平均值高 155.8%；叶绿素 b 含量为 0.01~0.27 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，平均值为 0.12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，P5 家系含量最高，比平均值高 209.3%；叶绿素 a+b 含量为 0.18~0.98 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，平均值为 0.50 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，P5 家系含量最高，比平均值高 160.2%；类胡萝卜素含量为 0.03~0.32 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，平均值为 0.13 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$ ，R2 家系含量最高，比平均值高 222.1%；硝酸还原酶活性为 1.16~10.26 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，平均值为 5.00 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，B5 家系含量最高，比平均值高 182.1%；谷氨酰胺合成酶活性为 0.30~1.24 $\text{A} \cdot \text{mg}^{-1} \text{protein} \cdot \text{h}^{-1}$ ，平均值为 0.54 $\text{A} \cdot \text{mg}^{-1} \text{protein} \cdot \text{h}^{-1}$ ，P4 家系含量最高，比平均值高 172.8%；总 ATP 酶含量为 0.37~3.55 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{prot}$ ，平均值为 1.36 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{prot}$ ，A9 家系含量最高，比平均值高 233.8%；PEP 羧化酶含量为 8.42~21.24 $\text{IU} \cdot \text{L}^{-1}$ ，平均值为 13.57 $\text{IU} \cdot \text{L}^{-1}$ ，B5 家系含量最高，比平均值高 94.5%；RUBP 羧化酶含量为 2.09~9.12 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，平均值为 6.92 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，B2 家系含量最高，比平均值高 101.5%。

表 1 红锥优树二代家系指标方差分析

Table 1 The variance analysis of second superior families of *Castanopsis hystrix*

家系	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+b	类胡萝卜素	硝酸还原酶	谷氨酰胺合成酶	总 ATP 酶	PEP 羧化酶	RUBP 羧化酶
Family	Chl a	Chl ab	Chl a+b	Carotenoid	NR	GS	Total ATPase	PEPCase	RUBPCase
	(mg·g ⁻¹ Fw)	(mg·g ⁻¹ Fw)	(mg·g ⁻¹ Fw)	(mg·g ⁻¹ Fw)	(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	(A·mg ⁻¹ protein·h ⁻¹)	(U·mg ⁻¹ prot)	(IU·L ⁻¹)	(ng·mL ⁻¹)
A1	0.14±0.00 s	0.05±0.00 n	0.19±0.01 s	0.03±0.01 f	2.04±0.07 kl	0.54±0.04 gh	0.42±0.02 no	12.3±0.8 jkl	6.92±0.58 fghij
A2	0.37±0.01 j	0.07±0.01 m	0.44±0.01 m	0.12±0.01 bcdef	1.16±0.06 m	0.67±0.04 e	0.92±0.05 ijkl	8.4±0.7 p	7.38±0.23 def
A3	0.20±0.01 q	0.07±0.01 m	0.27±0.02 q	0.06±0.00 def	5.73±0.38 f	0.36±0.02 kl	0.86±0.08 kl	18.4±1.7 b	8.21±0.08 b
A4	0.25±0.01 o	0.09±0.01 l	0.34±0.01 o	0.07±0.01 cdef	7.84±0.23 cd	0.42±0.01 ij	1.17±0.09 gh	15.9±0.7 c	8.14±0.18 bc
A5	0.37±0.01 jk	0.13±0.01 hij	0.49±0.02 l	0.09±0.00 bcdef	2.91±0.10 hi	0.73±0.03 d	0.40±0.01 no	13.8±0.6 fghi	6.50±0.03 ijkl
A6	0.41±0.01 hi	0.09±0.00 l	0.50±0.02 kl	0.13±0.01 bcdef	5.60±0.26 f	1.01±0.09 b	3.43±0.38 a	14.0±0.2 efgh	9.05±0.33 a
A7	0.35±0.01 kl	0.13±0.01 hi	0.48±0.02 l	0.16±0.01 bcdef	5.61±0.23 f	0.46±0.01 i	1.56±0.04 f	11.6±0.6 lm	6.37±0.23 jkl
A8	0.33±0.02 m	0.11±0.00 k	0.44±0.02 m	0.14±0.01 bcdef	9.34±0.58 b	0.40±0.03 jk	0.70±0.05 lm	10.6±0.3 mn	6.62±0.13 ghijkl
A9	0.41±0.02 i	0.13±0.01 ghi	0.54±0.02 ij	0.11±0.01 bcdef	9.30±0.83 b	0.46±0.00 i	3.55±0.13 a	9.0±0.8 p	6.30±0.32 kl
A10	0.28±0.00 n	0.09±0.01 l	0.38±0.01 n	0.13±0.00 bcdef	8.19±0.43 c	0.30±0.01 m	1.09±0.06 hijk	13.7±0.6 fghi	6.75±0.30 ghijkl
B1	0.24±0.00 op	0.07±0.01 m	0.32±0.01 p	0.07±0.00 cdef	4.62±0.40 g	0.54±0.01 gh	0.53±0.04 mno	16.2±0.7 c	2.09±0.02 n
B2	0.59±0.01 b	0.21±0.01 b	0.80±0.01 b	0.21±0.01 ab	3.14±0.25 h	0.58±0.02 fg	2.66±0.14 c	14.4±0.9 defg	9.11±0.32 a
B3	0.36±0.00 jk	0.13±0.01 gh	0.49±0.01 l	0.10±0.00 bcdef	2.43±0.10 ijk	0.43±0.01 ij	2.36±0.11 d	9.1±0.6 op	6.62±0.25 ghijkl
B4	0.43±0.01 gh	0.14±0.01 fg	0.57±0.01 h	0.13±0.01 bcdef	6.34±0.37 e	0.32±0.01 m	0.58±0.06 mno	13.0±0.1 ghijk	7.60±0.12 cde
B5	0.58±0.01 c	0.14±0.01 gh	0.71±0.02 d	0.17±0.00 bcdef	10.26±0.71 a	0.62±0.01 f	1.57±0.03 f	21.2±0.5 a	7.20±0.20 efgh
P1	0.42±0.01 hi	0.11±0.01 k	0.52±0.01 j	0.14±0.01 bcdef	2.69±0.08 hij	0.34±0.01 lm	1.13±0.14 hij	12.1±1.5 jkl	6.61±0.03 hijkl
P2	0.36±0.01 jk	0.13±0.02 hij	0.49±0.02 l	0.10±0.01 bcdef	7.47±0.32 d	0.54±0.02 gh	1.36±0.13 fg	15.4±1.2 cd	7.05±0.14 efghi
P3	0.51±0.01 e	0.18±0.01 c	0.69±0.01 e	0.14±0.00 bcdef	4.75±0.18 g	0.51±0.02 h	2.75±0.28 c	14.6±0.6 def	6.71±0.13 ghijkl
P4	0.13±0.01 s	0.12±0.01 ijk	0.24±0.01 r	0.07±0.01 cdef	4.39±0.15 g	1.24±0.02 a	0.91±0.10 jkl	18.0±0.8 b	6.99±0.38 fghi
P5	0.72±0.01 a	0.27±0.01 a	0.98±0.02 a	0.21±0.01 abc	2.37±0.07 jk	0.40±0.02 jk	1.02±0.10 hijk	14.1±1.1 efg	6.52±0.13 ijkl
P6	0.56±0.01 d	0.21±0.01 b	0.77±0.01 c	0.16±0.01 bcdef	3.10±0.32 h	0.39±0.01 jk	1.03±0.13 hijk	15.1±0.7 cde	7.21±0.47 efg
P7	0.49±0.01 f	0.19±0.01 c	0.68±0.01 e	0.18±0.00 bcde	2.51±0.21 ijk	0.42±0.01 ij	0.38±0.03 no	13.3±1.0 fghij	8.13±0.37 bc
D1	0.40±0.02 i	0.15±0.02 ef	0.55±0.01 hi	0.11±0.01 bcdef	4.57±0.17 g	0.92±0.01 c	1.15±0.15 ghi	12.7±0.8 hijkl	3.67±0.12 m
D2	0.44±0.02 g	0.16±0.01 de	0.59±0.01 g	0.19±0.00 bcde	6.36±0.28 e	0.40±0.02 jk	3.08±0.13 b	12.6±0.9 ijkl	6.90±0.63 ghijk
D3	0.17±0.02 r	0.01±0.00 p	0.18±0.02 s	0.05±0.00 ef	5.75±0.27 f	0.58±0.02 fg	1.20±0.16 gh	13.9±0.4 efgh	6.20±0.08 l
R1	0.23±0.01 p	0.03±0.00 o	0.26±0.01 q	0.08±0.01 bcdef	1.52±0.06 m	0.39±0.01 jk	0.72±0.06 lm	10.2±0.8 no	6.32±0.24 jkl
R2	0.34±0.01 lm	0.12±0.01 jk	0.46±0.01 m	0.32±0.44 a	1.63±0.05 lm	0.71±0.02 de	0.37±0.10 o	12.0±0.3 kl	7.63±0.52 cde
R3	0.48±0.00 f	0.16±0.01 d	0.64±0.01 f	0.20±0.01 bcd	4.36±0.39 g	0.61±0.01 f	0.61±0.04 mn	14.1±0.9 efg	7.88±0.69 bcd
R4	0.41±0.01 i	0.11±0.01 k	0.52±0.02 jk	0.13±0.01 bcdef	8.96±0.57 b	0.45±0.01 i	1.97±0.05 e	14.1±0.7 efg	7.97±0.18 bc

注：同列小写字母表示差异显著水平（ $P<0.05$ ）。下同。

Note: Minuscul within the same column mean significant difference in the table ($P<0.05$). The same below.

2.2 单个指标选择的潜力

对单个指标的选择（表 2）可以了解红锥优树二代家系内各指标遗传改良的最大潜力。

每个指标下排名前 10 的优良家系相互交叉但不完全相同。排名前 10 的家系平均值高出总体平均值最大的指标为总 ATP 酶含量，其次为硝酸还原酶活性，最小的为 RUBP 羧化酶含量。

表 2 单个指标下红锥优树二代家系的选择

Table 2 The second superior families of *Castanopsis hystrix* selection under single index

指标 Index	入选家系 Selected family	入选后平均值 Average value after selected	>总体平均值 > Overall average(%)
叶绿素 a <u>Chl a</u>	P5、B2、B5、P6、P3、P7、R3、D2、B4、P1	0.52	37.7
叶绿素 b <u>Chl b</u>	P5、B2、P6、P7、P3、R3、D2、D1、B4、B5	0.18	46.0
叶绿素 a+b <u>Chl a+b</u>	P5、B2、P6、B5、P3、P7、R3、D2、B4、D1	0.70	39.4
类胡萝卜素 <u>Carotenoid</u>	R2、B2、P5、R3、D2、P7、B5、P6、A7、P1	0.19	49.0
硝酸还原酶 <u>NR</u>	B5、A8、A9、R4、A10、A4、P2、D2、B4、D3	7.98	59.7
谷氨酰胺合成酶 <u>GS</u>	P4、A6、D1、A5、R2、A2、B5、R3、B2、D3	0.77	41.2
总 ATP 酶 <u>Total ATPase</u>	A9、A6、D2、P3、B2、B3、R4、B5、A7、P2	2.43	78.5
PEP 羧化酶 <u>PEPCase</u>	B5、A3、P4、B1、A4、P2、P6、P3、B2、R3	16.33	20.3
RUBP 羧化酶 <u>RUBPCase</u>	B2、A6、A3、A4、P7、R4、R3、R2、B4、A2	8.11	17.2

2.3 红锥二代优良家系的苗期选择

2.3.1 主成分分析法

由表 3 可以看出，根据累计贡献率>80%的原则选取前 4 个主成分进行分析，它们的累计贡献率为 80.6%，表明前 4 个主成分能代表所有抗旱指标进行不同家系间抗旱性评价。第 1 主成分主要有叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素（a+b）、类胡萝卜素，其特征值为 3.56，贡献率为 39.6%；第 2 主成分主要有硝酸还原酶、总 ATP 酶、PEP 羧化酶，其特征值为 1.47，贡献率为 16.3%；第 3 主成分主要有谷氨酰胺合成酶、PEP 羧化酶，其特征值为 1.20，贡献率为 13.3 %；第 4 主成分主要有谷氨酰胺合成酶、总 ATP 酶、RUBP 羧化酶，其特征值为 1.03，贡献率为 11.4%。

运用主成分分析法对 29 个红锥优树二代家系进行优选排序，排序前 10 的家系（表 4）排序分别为：B2>B5>P5>A6>P3>P6>R3>D2>P7>R4。

表 3 29 个红锥优树二代家系主成分分析

Table 3 Principal component analysis of indices of 29 second superior families of *Castanopsis hystrix*

指标 Index	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4
叶绿素 a Chl a	0.96	0.01	-0.01	-0.10	0.27	0.01	-0.01	-0.09
叶绿素 b Chl b	0.91	-0.05	0.16	-0.13	0.26	-0.04	0.13	-0.12
叶绿素 a+b Chl a+b	0.98	-0.01	0.04	-0.11	0.27	0.00	0.03	-0.10
类胡萝卜素 Carotenoid	0.77	-0.22	0.08	0.11	0.22	-0.15	0.07	0.11
硝酸还原酶 NR	-0.05	0.86	-0.23	-0.26	-0.01	0.59	-0.20	-0.25
谷氨酰胺合成酶 GS	-0.17	0.09	0.68	0.58	-0.05	0.06	0.57	0.56
总 ATP 酶 Total ATPase	0.33	0.53	-0.42	0.49	0.09	0.36	-0.35	0.48
PEP 羧化酶 PEPCase	0.03	0.58	0.69	-0.33	0.01	0.39	0.57	-0.32
RUBP 羧化酶 RUBPCase	0.34	0.24	-0.02	0.48	0.10	0.17	-0.01	0.46

特征值	3.56	1.47	1.2	1.03	3.56	1.47	1.2	1.03
贡献率	39.6	16.3	13.3	11.4	39.6	16.3	13.3	11.4
累积贡献率	39.6	55.9	69.2	80.6	39.6	55.9	69.2	80.6

表 4 29 个红锥优树家系指标主成分综合得分

Table 4 Comprehensive principal component scores of 29 second superior families of <i>Castanopsis hystrix</i>						
家系	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	综合得分	排名
Family	Component 1 score	Component 2 score	Component 3 score	Component 4 score	Synthesis score	Rank
B2	1.84	0.22	0.22	1.23	8.39	1
B5	0.90	2.27	1.38	-1.17	6.99	2
P5	2.28	-1.01	0.53	-1.16	6.10	3
A6	0.13	1.40	0.39	2.95	6.03	4
P3	0.93	0.54	-0.24	0.16	4.00	5
P6	1.26	-0.46	0.44	-0.88	3.45	6
R3	0.80	-0.40	0.79	0.00	3.21	7
D2	0.80	0.61	-1.17	0.42	2.77	8
P7	0.99	-1.02	0.38	-0.37	2.09	9
R4	0.12	1.30	-0.71	0.00	1.49	10

2.3.2 隶属函数法

运用隶属函数法排序后，排在前 10 的家系（表 5）分别为：B2>B5>A6>D2>A9>P3>P5>R4>P6>R3。

表 5 29 个红锥优树二代家系指标隶属函数值

Table 5 Membership function method scores of 29 second superior families of <i>Castanopsis hystrix</i>											
家系	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a+b	类胡萝卜素	硝酸还原酶	谷氨酰胺合成酶	总 ATP 酶	PEP 羧化酶	RUBP 羧化酶	综合得分	排名
Family	Chl a	Chl b	Chl a+b	Carotenoid	NR	GS	total ATPase	PEPCase	RUBPCase	Synthesis score	Rank
B2	0.79	0.78	0.78	0.63	0.22	0.30	0.72	0.46	1.00	0.61	1
B5	0.76	0.49	0.66	0.47	1.00	0.34	0.38	1.00	0.73	0.61	2
A6	0.49	0.30	0.40	0.33	0.49	0.75	0.96	0.43	0.99	0.58	3
D2	0.52	0.58	0.52	0.54	0.57	0.10	0.85	0.32	0.68	0.55	4
A9	0.47	0.47	0.44	0.25	0.89	0.16	1.00	0.04	0.60	0.55	5
P3	0.66	0.65	0.64	0.35	0.39	0.22	0.75	0.48	0.66	0.54	6
P5	1.00	1.00	1.00	0.61	0.13	0.10	0.20	0.44	0.63	0.53	7
R4	0.48	0.38	0.42	0.32	0.86	0.16	0.50	0.44	0.84	0.48	8
P6	0.73	0.78	0.73	0.43	0.21	0.10	0.21	0.52	0.73	0.45	9
R3	0.60	0.60	0.58	0.56	0.35	0.33	0.07	0.44	0.83	0.43	10

2.3.3 优良家系综合选择

利用主成分分析和隶属函数法 2 种评价方法得到的结果不完全相同，但总体趋势一致

(表 4 和表 5)以 2 种方法中共有的家系为入选家系, 选出 B2、B5、P5、A6、P3、P6、R3、D2、R4。

3 结论与讨论

植物生理代谢过程是环境及基因调控共同作用的结果。在控制环境下, 若某一植物在某种性状上基因型存在差异, 那么该种差异将会体现在与之对应的生理生物标记上(蔡红梅等, 2010; 姜磊等, 2005)。本研究中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、总 ATP 酶、PEP 羧化酶、RUBP 羧化酶在 29 个红锥优树二代家系间具有显著性差异, 反映出红锥优树二代家系间存在丰富的遗传多样性, 这为开展红锥优树二代家系的苗期选择提供了物质基础。同样赵蓉等(2013)对栓皮栎优树子代硝酸还原酶等生理生化特性进行了研究也认为栓皮栎子代家系之间存在显著差异, 可以初步作为栓皮栎速生性状早期选择的指标。

从单个指标进行选择红锥优树二代家系, 各指标入选的家系存在一定的重复和差异。说明各光合碳氮同化生理指标之间存在一定相关性, 各指标所反映的信息存在重叠性; 另一方面也说明, 单个指标在红锥生长过程作用不同, 对红锥优良家系进行筛选准确性存在偏差。因此, 通过多指标的方法进行评价和筛选才能更好的达到预期的目的。目前多指标的综合筛选与评价主要有隶属函数法、主成分分析法和聚类分析法(杨升等, 2013)。姜顺邦等(2016)运用隶属函数法对闽楠优树子代苗期进行了优选。高红霞等(2016)同时采用隶属函数法和主成分分析法对红砂家系进行评价, 最终两种方法筛选出的优良家系重合率达到了 80%。本研究得出了类似的结果, 两种方法综合评价筛选出的排名前 10 的家系, 重复率达到了 90%, 分别为 B2、B5、P5、A6、P3、P6、R3、D2、R4 家系。这表明主成分分析法和隶属函数法均可用于评价红锥二代优良家系。对比本试验前期对生长研究结果苗高(B2、A7、B5、A8、P3、B4、A6、R4、D2 和 R3)、地径(B2、A7、B5、P3、P2、A3、R4、D2、A6 和 A2)排名前 10 位的家系可以看出, 生理指标与苗高、地径排名前 10 的家系重复率均达到了 60%以上。说明利用光合碳氮同化过程中关键物分析红锥优良家系的苗期选择具有一定的可行性。

本研究采用 9 个光合碳氮同化过程中关键生理生化指标, 对红锥优树二代家系进行苗期选择, 其结果与后期家系生长表现是否密切相关, 还有待进一步验证。在未来研究中, 将持续观测其他生长及生理生化指标(如树高、胸径、材积、光合等), 进一步优化评价体系, 以更好的探讨红锥苗期选择的可靠性。

参考文献:

- CAI HM, XIAO JH, ZHANG QF, et al, et al, 2010. Co-suppressed glutamine synthetase2 gene modifies nitrogen metabolism and plant growth in rice[J]. *Chin Sci Bull*, 55(10): 871-882. [蔡红梅, 肖景华, 张启发, 等(2010). 抑制表达谷氨酰胺合成酶基因对水稻氮代谢和生长发育的影响[J]. 科学通报, 55(10): 871-882.]
- CAI RG, ZHANG M, YIN YP, et al, et al, 2008. Photosynthetic characteristics and antioxidative metabolism of flag leaves in responses to nitrogen application in wheat during grain filling[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(1):53-62. [蔡瑞国, 张敏, 尹燕桦, 等, 2008. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究[J]. 中国农业科学, 41(1): 53-62.]
- CHEN LS, 2009. There searches on seed quality and seedling growth characteristics of *Pistacia chinensis* bunge from different provenances[D]. Nanjing Forestry University. [陈隆升, 2009. 不同种源黄连木种子品质与苗期生长特性研究[D]. 南京林业大学.]
- CHEN Y, LIU S L, YANG R J, et al, et al, 2015. Effects of cadmium on growth, plasma membrane ATPase activity, and absorption of N, P and K in *Solanum nigrum* L. seedlings[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 21(9): 121-128.

- [陈颖, 刘柿良, 杨容子, 等, 2015. 镉胁迫对龙葵生长、质膜 ATP 酶活性及氮磷钾吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 21(01): 121-128.]
- DU K B, Xu L, SHEN B X, ~~et al~~, ~~et al~~. 2009. Genetic analysis and seedling selection of the *Poplar progenies* of aigeiros section[J]. J Huazhong Agric Univ, 28(05): 624-630. [杜克兵, 许林, 沈宝仙, 等, 2009. 黑杨派杨树杂交子代的遗传分析及苗期选择[J]. 华中农业大学学报, 28(05): 624-630.]
- GAO HX, SU SP, LI Y, ~~et al~~, ~~et al~~. 2016. Early selection of drought-resistant superior families of *Reaumuria soongorica* based on analysis of osmoregulation substances and chlorophyll[J]. Chin J Appl Ecology, Jan, 27(01): 40-48. [高红霞, 苏世平, 李毅, 等, 2016. 基于渗透调节物质及叶绿素分析红砂抗旱优良家系的早期选择[J]. 应用生态学报, 27(01): 40-48.]
- HAO NB, DU WG, 1991. A comparative study of PEPC activity of green organs in C₃ plant[J]. Acta Bot Sin, (9): 692-697. [郝乃斌, 杜维广, 1991. C₃ 植物绿色器官 PEP 羧化酶活性的比较研究[J]. 植物学报, (9): 692-697.]
- JIANG Y, LI ZH, ZHU JY, ~~et al~~, ~~et al~~. 2013. Diurnal variations of photosynthetic characteristics of different provenances *Castanopsis hystrix* A. DC. young plantations[J]. J Centr S Univ For & Technol, 33(06): 43-47. [蒋焱, 李志辉, 朱积余, 等, 2013. 不同红锥种源幼林光合特性日变化测定与分析[J]. 中南林业科技大学学报, 33(06): 43-47.]
- JIANG L, YANG XY, 2005. Applications of physiological and biochemical indexes in tree genetics and breeding[J]. Hebei J For Orch Res, (01): 76-79. [姜磊, 杨秀艳, 2005. 生理生化指标在林木遗传育种中的应用[J]. 河北林果研究, (01): 76-79.]
- JIANG BS, ZHANG Y, WEI XL, ~~et al~~, ~~et al~~. 2016. Growth and photosynthetic physiology for two groups of *Phoebe bournei* plus tree seedlings[J]. J Zhejiang A & F Univ, 33(01): 51-59. [姜顺邦, 张怡, 韦小丽, 等, 2016. 不同闽楠优树子代苗期生长及光合生理特性比较[J]. 浙江农林大学学报, 33(1): 51-59.]
- LIU D Y, LI G Q, LI L F, ~~et al~~, ~~et al~~. 2009. Seedling selection of superior families and excellent-individuals selection of *Pinus yunnanensis*[J]. J NW For Univ, 24(04): 67-72. [刘代亿, 李根前, 李莲芳, 等, 2009. 云南松优良家系及优良个体苗期选择研究[J]. 西北林学院学报, 24(04): 67-72.]
- LIU SL, YANG RJ, MA MD, ~~et al~~, ~~et al~~. 2015. Effects of exogenous NO on the growth, mineral nutrient content, antioxidant system, and ATPase activities of *Trifolium repens* L. plants under cadmium stress [J]. Acta Physiol Plant, 37 (1): e1721
- PAN RZ, 2010. Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press. [潘瑞炽, 2010. 植物生理学(第 6 版)[M]. 北京: 高等教育出版社.]
- WANG JH, GU WC, LI B, ~~et al~~, ~~et al~~. 2000. Study on selection of *alnus cremastogyne* provenance/family — analysis of growth adaptation and genetic stability[J]. Sci Silv Sin, (03): 59-66. [王军辉, 顾万春, 李斌, 等, 2000. 桤木优良种源/家系的选择研究——生长的适应性和遗传稳定性分析[J]. 林业科学, (03): 59-66.]
- WU ZF, SUN XW, WANG C B, ~~et al~~, ~~et al~~. 2014. Effects of low light stress on rubisco activity and the ultrastructure of chloroplast in functional leaves of peanut[J]. Chin J Plant Ecol, 38(07): 740-748. [吴正锋, 孙学武, 王才斌, 等, 2014. 弱光胁迫对花生功能叶片 RuBP 羧化酶活性及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物生态学报, 38(07): 740-748.]
- YANG L, ZHAO HW, LIU JH, 2007. Effects of different nitrogen application on GS activity and yield in different quality spring maize varieties[J]. J NE Agric Univ, 38(3):320-324. [杨亮, 赵宏伟, 刘锦红, 2007. 氮素用量对春玉米功能叶片谷氨酰胺合成酶活性及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 38(3): 320-324.]
- YANG S, LIU ZX, ZHANG HX, ~~et al~~, ~~et al~~. 2013. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening identification indexes for three tree species[J]. Sci Silv Sin, 49(01): 91-98. [杨升, 刘正祥, 张华新, 等, 2013. 3 个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学, 49(01): 91-98.]
- YANG XY, JI KZ, 2004. Early selection in forest tree improvement[J]. World For Res, (02): 6-8. [杨秀艳, 季孔

庶, 2004. 林木育种中的早期选择[J]. 世界林业研究, (02): 6-8.]

ZHAO R, ZHANG CX, ZHANG WH, 2013. Physiological and biochemical characteristics of *Quercus variabilis* in plus tree progeny[J]. J NW For Univ, 28(01): 86-89. [赵蓉, 张存旭, 张文辉, 2013. 栓皮栎优树子代生理生化特性的研究[J]. 西北林学院学报, 28(01): 86-89.]

ZHU JY, SHEN WH, JIANG Y, ~~et al~~, ~~et al~~, 2014. Genetic variation and superior family selection of *Castanopsis hystrix* families[J]. J Trop Subtr Bot, 22(03): 270-280. [朱积余, 申文辉, 蒋焱, 等, 2014. 红锥家系遗传变异与优良家系选择[J]. 热带亚热带植物学报, 22(03): 270-280.]

ZOU Q, 2000. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: China Agriculture Press: 163-165. [邹琦, 2000. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社: 163-165.]

ZHOU Z Q, LI J W, DENG X Y, ~~et al~~, ~~etal~~, 2009. The ATPase activity in phloem cells and its relation to the accumulation of photo-assimilates in developing caryopsis during wheat grain filling[J]. Sci Agric Sin, (42): 2314-2325. [周竹青, 李继伟, 邓详宜, 等, 2009. 小麦颖果韧皮部细胞 ATPase 活性及其与籽粒光合同化物积累关系[J]. 中国农业科学, (42): 2314-2325.]